

仿爱夜蛾成虫排泄物对敦煌石窟壁画的损害及其治理

汪万福^{1,2}, 蔺创业³, 王涛¹, 马赞峰²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2. 敦煌研究院保护研究所, 甘肃敦煌 736200;

3. 敦煌市林业技术推广中心, 甘肃敦煌 736200)

摘要: 通过模拟实验与现场调查相结合的方法研究了仿爱夜蛾 *Apopestes spectrum* (Esper) 成虫对敦煌石窟壁画的损害及其治理。结果表明: 仿爱夜蛾成虫在石窟中的时空分布具有一定的规律性, 成虫密度在上、中、下3层洞窟呈依次增加的趋势, 与洞窟内温、湿度有关; 在1年内表现为8月份洞窟内成虫数量多, 与洞外成虫羽化的高峰期相一致。成虫排泄物污染壁画面积年平均达150 mm²/蛾, 且对不同颜料的影响有差异, 对白色和蓝色影响较大, 对红色和褐色的影响较小。排泄物不仅直接污染壁画表面, 而且, 其残余物中含有磷酸盐和碳酸盐等, 酸性物质在与壁画颜料、地仗及空气的作用过程中均对壁画产生腐蚀。在开展物理防治的基础上, 选用15%灭幼脲三号胶悬剂或2.5%敌杀死乳油, 于6月上旬防治2~3龄幼虫, 灭幼脲喷药后第10天和敌杀死喷药后72 h的防治效果可分别达到85.6%和97.6%。

关键词: 仿爱夜蛾; 排泄物; 壁画; 损害; 治理; 敦煌石窟

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2005)01-0074-08

Damages by excretion of *Apopestes spectrum* (Esper) imagos on the Dunhuang murals and their control

WANG Wan-Fu^{1,2}, LIN Chuang-Ye³, WANG Tao¹, MA Zan-Feng² (1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. The Conservation Institute, Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China; 3. Dunhuang Forestry Technology Center, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: Damages by excretion of *Apopestes spectrum* (Esper) imagos on the Dunhuang murals and their control measures were studied through field investigations and simulating experiments in Mogao Grottoes, Dunhuang and Yulin Grottoes, Yulin, Gansu Province. The results showed that the spatial distribution of *A. spectrum* imagos within the caves had the following patterns: imago numbers increased from the lower caves to upper caves, and this in turn was closely related with temperature and humidity in caves. The occurrence peak of *A. spectrum* imagos inside caves was in August, which was consistent with the emergence peak of the moth in fields. Excretion of a single imago could pollute as much as 150 mm² murals annually in average, but the damages on murals were different due to color variations. Excretion of the moth caused high damages on murals with blue and white colors, slight damages on that with red and brown colors, and low damages on that with red and brown colors. The excretion not only polluted mural surfaces, but also eroded the murals as acidic materials such as phosphates and carbonates within the excrements reacted with color materials, plaster layers and air. Besides the physical prevention method (screening caves against moths), biological agents and chemicals were tested for controlling *A. spectrum* larvae in the first 10 days of June, and the control efficacies on 2nd–3rd instar larvae of the moth reached as high as 85.6% in 10 days after spraying 15% chloromethiuron and 97.6% in 72 hours after spraying 2.5% deltamethrin.

Key words: *Apopestes spectrum*; excretion; mural; damage; control; Dunhuang caves

分布于我国西北地区的石窟如甘肃敦煌的莫高窟、西千佛洞, 安西榆林窟、东千佛洞, 天水麦积山,

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G2000048705); 国家文物局文物保护科学和技术研究课题(9907); 敦煌研究院资助项目

作者简介: 汪万福, 男, 1966年生, 甘肃甘谷人, 副研究员, 在职博士生, 主要从事干旱区环境与壁画保护修复等方面的研究, E-mail: wwanfu@hotmail.com; wangwanfu@yahoo.com

收稿日期 Received: 2004-03-23; 接受日期 Accepted: 2004-12-17

庆阳北石窟,张掖马蹄寺、金塔寺等,新疆的龟兹石窟、伯兹克里克石窟、库木吐拉石窟等,几乎都不同程度地受到有害生物的侵蚀,有些已到非常严重的程度。寺院壁画也不例外,如青海的瞿坛寺、塔尔寺等,西藏的布达拉宫、大昭寺、罗布林卡、扎什伦布寺、萨迦寺、桑耶寺、扎塘寺、坚耶寺等。

多年来我国文物保护工作者对壁画有害物和有害生物防治方面做了大量研究工作,从不同的角度研究了光、温度、湿度、微生物、空气污染、风沙尘等对壁画的影响(徐毓明,1982;马清林等,1996;冯清平等,1998;李最雄,2000;汪万福等,2000)。在昆虫的损害方面,国内外文物保护工作者主要就昆虫对馆藏文物的危害及防治进行了较为深入的研究(Selwitz and Maekawa, 1998; Koestler *et al.*, 2000; Alencon *et al.*, 2004),而昆虫对石窟壁画的侵蚀与危害方面的研究报道几为空白,目前见到的相关研究报道也只局限于对昆虫生活习性、发生规律及其防治的初步研究(汪万福和蔺创业,2001)。这一现象说明这方面的研究工作还没有引起学者们的足够重视,而昆虫对露天壁画、石窟壁画、馆藏文物及木制古建筑的损坏随处可见,有些已造成较大的经济损失和严重的社会后果(汤成如,1998;袁克和朱宏斌,2002;王春和于小玲,2003)。

仿爱夜蛾 *Apopestes spectrum* (Esper)属鳞翅目夜蛾科,国内分布于陕西、宁夏、新疆、四川,国外分布于阿富汗、伊朗等,幼虫主要危害苦豆子 *Sophora alopecuroides*。1996年在敦煌莫高窟洞窟中首次发现仿爱夜蛾成虫,此后窟中蛾量逐年上升(汪万福和蔺创业,2001)。其成虫具有趋光性,白天潜伏于树干、土缝、洞窟等光线较暗处,傍晚活动;卵散产于叶片正面;老熟幼虫于6月下旬至7月上旬结茧化蛹。我们以敦煌莫高窟及安西榆林窟为例,对仿爱夜蛾成虫在典型洞窟中的分布规律,其排泄物对壁画的危害程度与方式,以及综合防治试验等几个方面进行了研究,结果如下。

1 材料与方法

1.1 供试成虫

于2001年6月上旬,在莫高窟窟区采集仿爱夜蛾2~3龄幼虫,选择与洞窟环境条件相近的地窖进行饲养(饲养期间平均气温 $10.5^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度 $30.4\% \pm 3.8\%$),每天早晨将苦豆子枝叶部分用清水冲洗干净,卫生纸蘸水保湿,直立于饲养缸

内,供幼虫取食。成虫羽化后接入尼龙网笼(高100 cm,直径50 cm)内,用5%蜂蜜液饲养2~3天后移入玻璃容器(10.5 cm × 10.5 cm × 10.5 cm)中,用纱布封口,继续饲养、观察、测试。8~9月,白天放入地窖,晚上取出。从10月15日至次年5月15日一直放在地窖中饲养。

1.2 模拟壁画及其被仿爱夜蛾排泄物的污染

敦煌壁画的地仗层一般由草泥层、麻泥层、棉花泥层构成,壁画制作时,颜料用以牛皮胶为主、混有植物胶作粘合剂(李云鹤,1993;李实,1993)。模拟壁画地仗试块按沙子:澄板土=1:4(W/W)的比例适当加入麻丝,用蒸馏水和泥,充分搅拌均匀后制成(9.0 cm × 9.0 cm × 1.5 cm)。待试块干燥后,用生石灰水在表面涂刷两遍,晾干。然后,将矿物颜料石青、石绿、朱砂、铅丹、土红、群青、石膏和石灰,拌和适量1%(W/W)骨胶溶液,在制好的地仗试块上每种颜料涂刷3块,分别涂刷两遍,8种颜料共制成24块模拟壁画试块,并将其水平放入10.5 cm × 10.5 cm × 10.5 cm的玻璃容器中。将成虫分为4组(每组3~4头)放入玻璃容器内。从2001年7月10日~2002年5月10日,每月定期用透明米格纸测算模拟壁画试块被成虫排泄物污染面积1次,并用红笔标示,以免与下次重复。

1.3 仿爱夜蛾在洞窟中分布和迁移的调查

2000年1月,调查仿爱夜蛾成虫在敦煌莫高窟、安西榆林窟各洞窟中的空间分布特征;同年1~12月,分别选择莫高窟第53窟及榆林窟第38窟定期(每月2次)观察洞窟内成虫数量的消长情况,并同步观察成虫在窟内及壁画表面的迁移行为。用美国OMEGA GENINERNG公司的粘附性温度探头和VAALA公司的HMP35AC型湿度探头监测洞窟内温、湿度,洞窟外温、湿度用莫高窟崖顶全自动气象站数据,数据采集密度分别为30 s和15 s 1次。

1.4 被害壁画的取样与分析

分别在莫高窟第85窟南披东南角和东披东南角,用手术刀割取约1 mm²被成虫粪便污染的壁画样品,用热塑性树脂制成剖面,在Nikon HFX-IIA实体显微镜和OLYMPUS BH-2偏光显微镜下观察其结构,绘制剖面图。用同样的方法在南披西南角有成虫分泌残余物的壁画表面取样,用傅立叶变换红外光谱仪(FTIR Infrared Spectroscopy)分析。

1.5 颜色监测

在莫高窟第85窟东披选择被成虫粪便污染的6种颜色8个点和未被污染的8种颜色9个点,采用

Minolta CQ-121 色度计(使用标准 C 光源)测定色度,以色差 ΔE 表示污染与未污染の色度变化大小。色差值 ΔE 按下式求出:

$$\Delta E = \Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2$$
(L:亮度;a, b:色度指数)

1.6 综合防治试验

沙网隔离防治:选择 4 个典型洞窟分别于 1998 年 7 月 20 日、8 月 5 日和 8 月 21 日调查未安装纱窗的洞窟(莫高窟第 53 窟和榆林窟第 36 窟)和安装了纱窗的洞窟(莫高窟第 85 窟和榆林窟第 37 窟)内夜蛾成虫密度的变化。

生物防治:按丁贵银等(1996)的方法进行。在莫高窟和榆林窟采集足够量的 2~3 龄幼虫,用 15% 灭幼脲三号胶悬剂,苏云金杆菌(王卫国等,2003)于 6 月上旬进行喷药试验,用自来水作对照,均重复 3 次,统计喷药后第 10 天的校正死亡率。

化学防治:按王宗楷(1986)的方法进行。用 2.5% 敌杀死乳油,20% 杀灭菊酯乳油,25% 氧乐菊酯乳油进行防治试验,统计喷药 72 h 后的校正死亡率。校正死亡率按下式计算:

$$\text{校正死亡率}(\%) = \frac{\text{处理区死亡率} - \text{对照区死亡率}}{1 - \text{对照区死亡率}} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 成虫在石窟中的分布特点

莫高窟石窟群分上、中、下三层,距地面平均高度分别为 13.83、6.38 和 0 m,洞窟高依次为 6.31、4.96 和 4.70 m。1996~2000 年调查结果表明:在有壁画、彩塑的 492 个洞窟中,有成虫分布或受其排泄物危害的洞窟 75 个,占总洞窟的 15.2%,其中:下层洞窟 48 个(图版 I:A),占受害洞窟的 64%;中层洞窟 24 个,占 32%;上层洞窟 3 个,占 4%。2000 年 1 月调查结果表明,上、中、下 3 层洞窟内成虫数量呈依次增加的趋势(表 1)。

表 1 仿爱夜蛾成虫在莫高窟不同层次洞窟中的分布(2000.1)

Table 1 Spatial distribution of *Apopestes spectuam* imagos in caves at different layers of Mogao Grottoes (January, 2000)

	上层 Upper layer	中层 Middle layer	下层 Lower layer
温度 Temperature (°C)	4.4 ± 0.3	3.5 ± 0.6	12.4 ± 1.6
相对湿度 RH (%)	19.0 ± 1.3	33.4 ± 2.5	35.9 ± 1.8
蛾量(头)Number of imagos	41.0 ± 5.4	51.0 ± 3.0	180.0 ± 5.8

表中数据是平均值 ± 标准差,后同。The data in the table are mean ± SD; the same for the following tables and figures.

安西榆林窟石窟群分上、下 2 层,并由榆林河分为东崖、西崖两部分,共有洞窟 43 个,有成虫分布或受其危害的洞窟 18 个,占总洞窟的 41.7%,其中在西崖的几个洞窟分布广,危害最为严重(汪万福等,2003)。2000 年 8 月 18 日调查时,榆林窟第 38 窟主室西北披约有 400 头成虫(图版 I:B)。在同一洞窟中,成虫的分布具有在洞窟四披、藻井及四壁中上部居多的特点。8 月份成虫羽化的高峰期也是洞窟中成虫数量最多的时期。

石窟一般具有冬暖夏凉的特点,年温差变化小(图 1),为昆虫的生长发育提供了适宜场所。

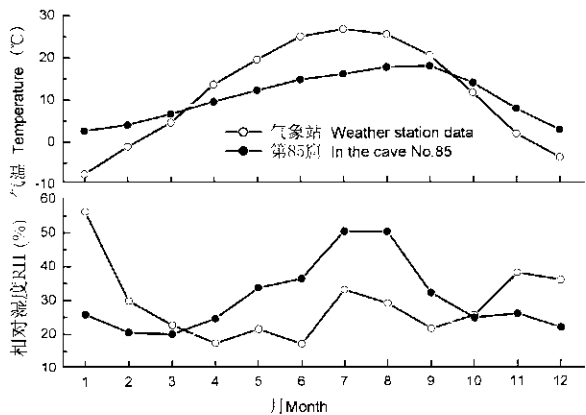


图 1 莫高窟内气温及相对湿度(RH)的变化(2000)

Fig. 1 Annual variation of temperature and RH in Mogao Grottoes (2000)

2.2 成虫排泄物对壁画的污染

成虫在 7~8 月份排泄物污染的壁画面积最大(图 2),平均每头成虫排泄物污染面积为 34.9 mm²。排泄物中含水量较大,初排出时为褐色糊状物,水分迅速向四周扩散。12 月和 1 月份成虫排泄物污染面积最小,平均每头成虫排泄物污染面积为 3.1 mm²。单头成虫排泄物年污染壁画面积最大达 188 mm²,最小为 112 mm²,平均约 150 mm²。1999 年 8 月 3~5 日在莫高窟第 53 窟、55 窟、85 窟调查时,3 个洞窟共有仿爱夜蛾成虫 263 头,按每头成虫年平均排泄物污染壁画面积 150 mm² 计算,约经过 2 万年时间,一头夜蛾成虫排泄物的累计污染面积与这 3 个洞窟的壁画总面积相近。

2.3 成虫排泄物对壁画的损害

2.3.1 偏光显微镜剖面分析:莫高窟第 85 窟南披壁画上的成虫排泄物污染(图版 I:C)可分为 3 层,分别为白色透明胶状层、黑色粪便层和棕黄色地仗层,层间结合紧密(图 3)。粪便外层是致密的胶状物,将粪便紧紧覆盖。遗留在壁画表面的粪便不仅

直接污染壁画，而且在水分散失和干燥过程中产生的收缩作用导致局部画面层的开裂、起翘，严重的甚至脱落。

同窟东披被污染的壁画表面(图版 I :D)可分为 4 层，即透明胶状物层、黑色粪便层、绿色颜料层和棕黄色地仗层(图 3)。粪便在干燥失水的过程中，同样导致壁画颜料层、白粉层甚至地仗层脱落。

2.3.2 红外光谱分析：图版 I (E,F)为成虫在莫高窟第 85 窟南披壁画表面分泌残余物，红外光谱分析(图 4)表明，分泌残余物中含有酰胺基类($3\,500\sim 3\,400\text{ cm}^{-1}$ ， $1\,624\text{ cm}^{-1}$)、 $\gamma\text{-Si-H}$ 基($2\,360\sim 2\,100\text{ cm}^{-1}$)、磷酸盐($1\,321\sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$)及碳酸酯。此外在壁画层中还检测到碳酸盐($1\,450\sim 1\,410\text{ cm}^{-1}$)。

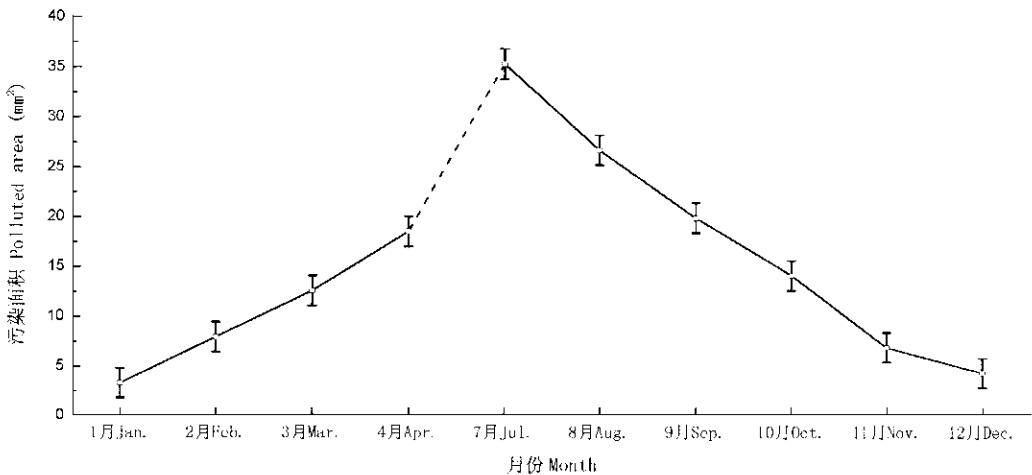


图 2 仿爰夜蛾成虫排泄物污染壁画面积的估算($\text{mm}^2/\text{蛾}$)

Fig. 2 Estimated mural area polluted by excretion from adult *A. spectuam* (mm^2/moth)

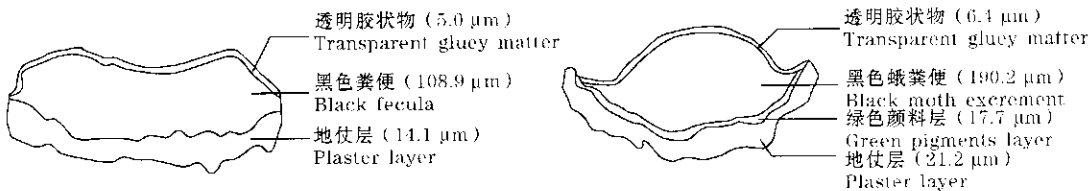


图 3 莫高窟第 85 窟南披(左)和东披(右)壁画表面蛾粪污染剖面示意图

Fig. 3 Profile diagram of moth feces pollution on mural surface on south slope (left) and east slope (right) walls in the cave No. 85 in Mogao Grottoes

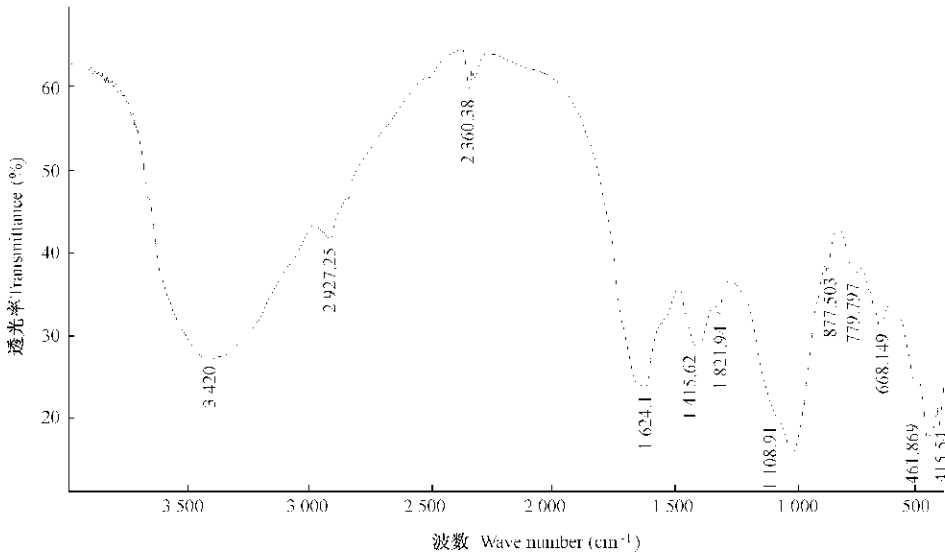


图 4 莫高窟第 85 窟壁画上夜蛾粪便的红外光谱分析

Fig. 4 Infrared spectrum of moth feces on mural in the cave No.85 in Mogao Grottoes

2.3.3 色差分析监测: 颜色监测结果(图 5)表明,昆虫排泄物对不同颜料的影响是不一样的。由于仿爱夜蛾排泄物本身为红褐或黑褐色,所以,对于褐色或红色颜料影响比较小,色差变化范围在 2 ~ 11 NBS 色差单位不等;对于白色和蓝色颜料影响比较大(9 ~ 21 NBS 色差单位);对于绿色颜料,色差变化

在 3 ~ 13 NBS 色差单位之间。对于同一种颜色来说,排泄物的量和堆积厚度对其色度影响也是不一样的,越厚的部位色差值越大,如绿色-1 和绿色-2 测试点,因厚度不同,其色差值相差 10 NBS 色差单位。由此可见,昆虫排泄物对于壁画表面颜色影响较大,远远超过粉尘的影响(汪万福等,2003)。

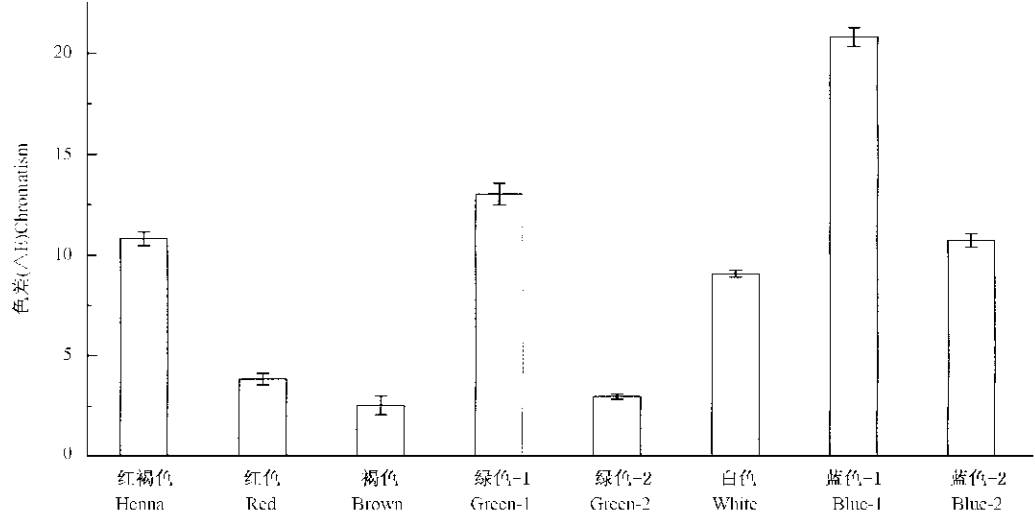


图 5 成虫排泄物对壁画表面颜色的影响
Fig. 5 Influence of moth excretion on colors of mural surface

2.4 综合防治试验

2.4.1 沙网隔离防治: 根据仿爱夜蛾的生活史,于 1998 年 7 ~ 8 月成虫羽化期,在洞窟门上安装纱窗(孔隙度 10%)等防护设施,使进入洞窟的成虫数量比未安装纱窗的减少了 75% 以上,有效的阻止了成虫进入洞窟,收到了较好的效果(表 2)。

表 2 安装纱窗对洞窟内仿爱夜蛾密度(蛾/m²)的影响(1998.7 ~ 8)
Table 2 Density (imagos/m²) change after screening the caves against adult *A. spectuam* (1998.7 - 8)

洞窟 Caves	无纱窗	有纱窗	变化(%) Change
	Without screen	With screen	
莫高窟 Mogao Grottoes	2.44 ± 0.16	0.08 ± 0.01	- 96.7
榆林窟 Yulin Grottoes	7.26 ± 0.21	4.40 ± 0.32	- 53.2
平均 Average	4.85 ± 2.41	2.24 ± 2.16	- 75.0

2.4.2 生物防治: 选用 15% 灭幼脲三号胶悬剂 300 倍液,或苏云金杆菌(每克含孢子量 1.5×10^{11}),对仿爱夜蛾 2 龄幼虫喷药防治,防治效果分别达 85.6% 和 61.5%(表 3)。

2.4.3 化学防治: 选择 2.5% 敌杀死乳油 4 500 倍液,或 20% 杀灭菊酯乳油 4 000 倍液,或 25% 氧乐菊酯乳油 1 500 倍液防治 2 ~ 3 龄幼虫,喷药 72 h 后防治效果分别为 97.6%、91.1% 和 85.3%(表 4)。

表 3 生物杀虫剂防治仿爱夜蛾 2 龄幼虫的效果

Table 3 Toxicity of biological agents to the 2nd instar larvae of <i>A. spectuam</i>			
制剂 Agent	稀释倍数 Dilution rate	供试总虫数 Sum of larvae tested	校正死亡率(%) Corrected mortality
15% 灭幼脲三号胶悬剂	1:300	153	85.6 ± 0.6
15% Chloromethiuron	1:400	148	60.2 ± 1.5
苏云金杆菌	孢子数/mL		
<i>B. thuringiensis</i>	Spores/mL		
	1.2×10^{11}	150	45.3 ± 1.0
	1.5×10^{11}	148	61.5 ± 3.3

表 4 化学药剂防治仿爱夜蛾 2 ~ 3 龄幼虫的效果

Table 4 Toxicity of chemical pesticides to the 2nd - 3rd instar larvae of <i>A. spectuam</i>			
杀虫剂 Pesticide	稀释倍数 Dilution rate	供试总虫数 Sum of larvae tested	校正死亡率(%) Corrected mortality
2.5% 敌杀死乳油	1:4 500	165	97.6 ± 1.2
2.5% Deltamethrin	1:5 000	149	91.1 ± 2.8
	1:5 500	150	84.4 ± 2.0
20% 杀灭菊酯乳油	1:4 000	147	91.1 ± 1.7
20% Fenvalerate sumicidin	1:4 500	150	86.5 ± 2.1
	1:5 000	148	80.1 ± 1.1
25% 氧乐菊酯乳油	1:1 500	145	85.3 ± 1.6
25% Omethoate	1:2 000	150	79.3 ± 3.1
	1:2 500	150	74.3 ± 1.6

3 小结

昆虫排泄物对敦煌石窟壁画的侵蚀与危害已逐渐被人们所认识,研究其损害机理,开展综合治理是文物保护工作者面临的重要研究课题之一。通过研究分析,可以得出如下初步结论:

(1)敦煌石窟冬暖夏凉、比较稳定的温、湿度条件为仿爱夜蛾成虫提供了适宜的生存场所。在上、中、下3层洞窟中成虫数量呈依次增加的趋势(表1),这种分布格型与洞窟内的温、湿度有关。8月份洞窟内成虫数量多,与成虫羽化的高峰期相一致。

(2)根据实验结果估算,每头成虫年排泄物污染壁画平均约 150 mm^2 。排泄物对不同颜料颜色的影响有差异。对白色和蓝色影响较大,红色和褐色较小,绿色适中(图5)。排泄物不仅直接污染壁画表面,而且,其分泌残余物中含有酰胺基类、 $\gamma\text{-Si-H}$ 基类物质、磷酸盐及碳酸盐等,酸性物质在与壁画颜料、地仗及空气作用的过程中均对壁画产生腐蚀作用。李最雄和 Michalski(1989)对莫高窟第138窟存放的9块壁画残块上27个颜料试样进行红外光谱分析后,发现20个颜料试样中含有草酸钙或其他草酸盐。古代壁画地仗和颜料层本身含有大量的碳酸钙与硫酸钙等,制作壁画时又在颜料和地仗层中掺加了天然有机胶结材料动物胶或植物胶,从材料方面为昆虫提供了食料来源。残留于壁画表面的昆虫分泌排泄物中的酸性物质与石膏、石绿等颜料作用而生成草酸钙和草酸铜。这些盐类在与壁画颜料、地仗、空气中的不同气体作用的过程中都会对壁画产生腐蚀作用。至于胺类、酰胺类等对壁画的影响尚需进一步的研究。成虫排泄物可在壁画表面形成一层致密的胶状物,其在干燥失水的过程中,致使壁画局部张力增大,导致其下的颜料层与其他颜料层开裂,最后导致壁画颜料层、白粉层甚至地仗层脱落。同时,仿爱夜蛾幼虫对窟区沙生植物造成危害,使本来就很脆弱的窟区生态环境更加恶化。

(3)昆虫排泄物包括气体(CO_2),液体(H_2O)和固体(氮和无机盐类的结晶体)3类(杨振德等,2003),如能进一步研究其与壁画颜料、地仗发生的各种化学反应,揭示其作用的机理,对正确认识其危害的严重性,做好壁画保护工作具有指导意义。

(4)从生态学、生物学角度入手,研究仿爱夜蛾的发生发展规律,开展以营林、物理机械、生物防治(引进天敌和寻求病原菌)(邓望喜等,2001)等为主

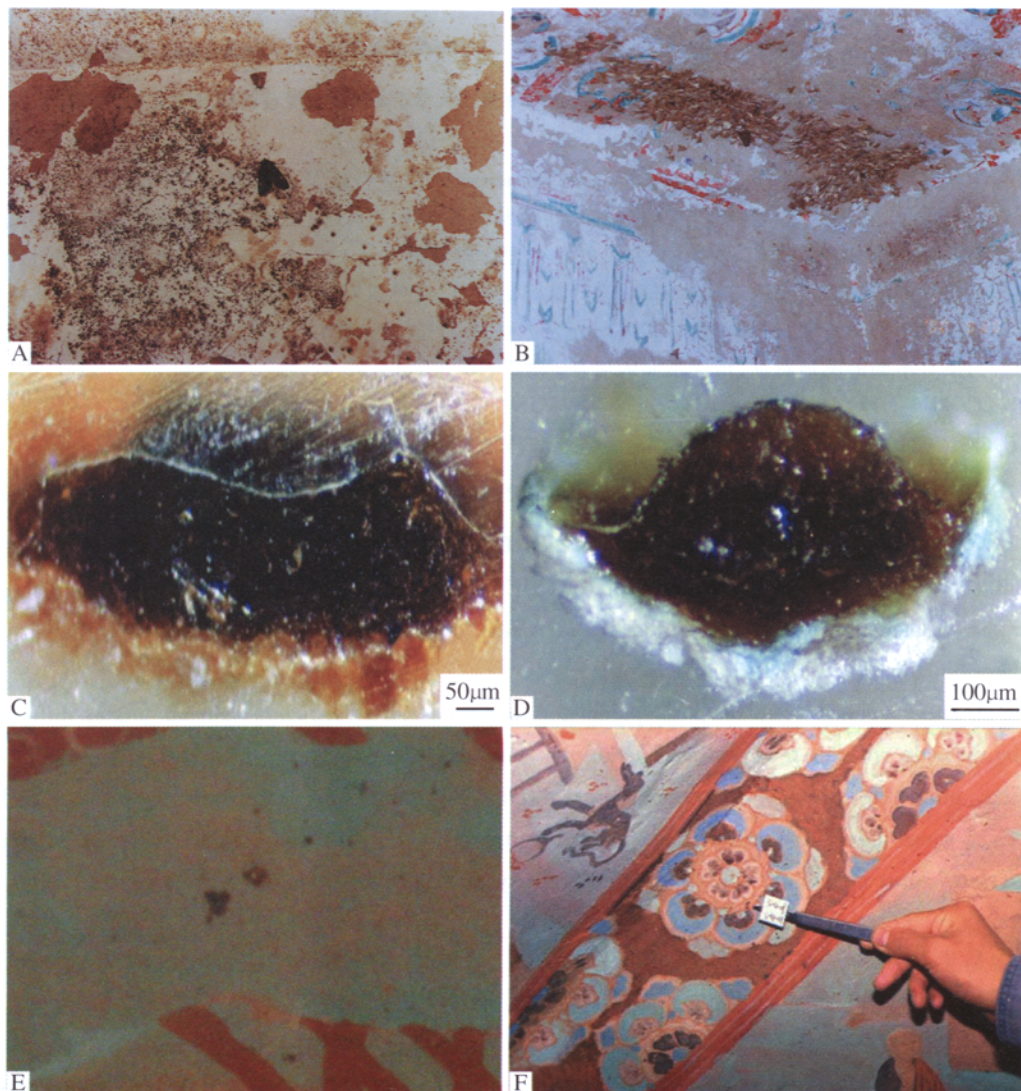
的综合防治工作均能取得较理想效果。鉴于石窟文物害虫防治的特殊性与局限性,对于已经进入洞窟的昆虫可人工捕捉,安装纱窗阻止进入。根据成虫的生活史及习性,在窟外开展综合治理,如清除寄主植物,恶化成虫生存条件。选用15%灭幼脉三号胶悬剂或2.5%敌杀死乳油,于6月上旬防治2~3龄幼虫等。同时,如能研制既有利于壁画保护,又可防治石窟害虫的新型环保并对壁画无负面影响的生物杀虫剂,对最终彻底解决这一问题具有积极意义。

参考文献 (References)

- Alencon ED, Piffanelli P, Volkoff AN, Sabau X, Gimenez S, Rocher J, Cerutti P, Fournier P, 2004. A genomic BAC library and a new BAC-GFP vector to study the homocentric pest *Spodoptera frugiperda*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 34: 331–341.
- Deng WX, Zhang HY, Hua HX, 2001. Advance in biological control of stored product insects in China. *Food Stores*, 30(2): 3–7. [邓望喜, 张宏宇, 华红霞, 2001. 中国储藏物害虫生物防治的研究进展. 粮食储藏, 30(2): 3–7]
- Ding GY, Li ZX, Gao JB, 1996. The experiment of controlling *Dendrolimus punctatus* Walker by *Beauveria tuiilemin* and *Bacillus thuringiensis*. *Forest Pest and Disease*, (3): 34–35. [丁贵银, 李志祥, 高景斌, 1996. 白僵菌和苏云金杆菌复配防治马尾松毛虫试验. 森林病虫害通讯, (3): 34–35]
- Feng QP, Zhang XJ, Ma QL, Ma XJ, 1998. Studies on microbiological factor in color change of Mogao Grottoes mural. II. Effect of microorganism on the pigment of imitative mural. *Acta Microbiological Sinica*, 38(2): 131–136. [冯清平, 张晓军, 马清林, 马晓军, 1998. 敦煌壁画色变中微生物因素的研究—II 微生物对模拟石窟壁画颜料的影响. 微生物学报, 38(2): 131–136]
- Koestler RJ, Sardjono S, Koestler DL, 2000. Detection of insect infestation in museum objects by carbon dioxide measurement using FTIR. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 45: 285–292.
- Li ZX, 2000. The protection condition and facing problem of Dunhuang Caves. *Dunhuang Research*, 63(1): 10–23. [李最雄, 2000. 敦煌石窟的保护现状和面临的任务. 敦煌研究, 63(1): 10–23]
- Li ZX, Michalski S, 1989. Report on the effect of light and humidity on the discoloration of hematite vermilion and red lead at Mogao Grottoes, Dunhuang. *Dunhuang Research*, 20(3): 80–91. [李最雄, Michalski S, 1989. 光和湿度对土红、朱砂和铅丹变色的影响. 敦煌研究, 20(3): 80–91]
- Linnie MJ, Keatinge MJ, 1999. Pest control in museums: toxicity of para-dichlorobenzene, 'Vapona', and naphthalene against all stages in the life-cycle of museum pests, *Dermestes maculatus* Degeer, and *Anthrenus verbasci* (L.) (Coleoptera: Dermestidae). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 45: 1–13.
- Li YH, 1993. Report on some preliminary studies on the restoration of wall paintings at Mogao Grottoes. In: Duan WJ ed. Collected Works of the Researches on Dunhuang (II). Parts of Conservation of Grottoes. Lanzhou: Gansu People's Publishing House. 242–254. [李云鹤,

1993. 莫高窟壁画修复初探. 见: 段文杰主编. 敦煌研究文集石窟保护篇(下). 甘肃人民出版社. 242-254]
- Li S, 1993. The preliminary study of the cementation material of Dunhuang wall painting. In: Duan WJ ed. Collected Works of the Researches on Dunhuang (II). Parts of Conservation of Grottoes. Lanzhou: Gansu People's Publishing House. 11-20. [李实, 1993. 对敦煌壁画胶结材料的初步认识. 见: 段文杰主编. 敦煌研究文集石窟保护篇(下). 甘肃人民出版社. 11-20]
- Ma QL, Hu ZD, Li ZX, 1996. Microorganism erodes and damages to the mural pigment. *Dunhuang Research*, 49(3): 136-144. [马清林, 胡之德, 李最雄, 1996. 微生物对壁画颜料的腐蚀与危害. 敦煌研究, 49(3): 136-144]
- Selwitz C, Maekawa S, 1998. Inert Gases in the Control of Museum Insect Pests. Getty Conservation Institute. Printed in the United States of America, 10987654321. 17-28.
- Tang CR, 1998. Prevention and cure of termite damages to buildings. *Anhui Construction*, (3): 14-15. [汤成如, 1998. 房屋建筑受白蚁危害的防治. 安徽建筑, (3): 14-15]
- Wang C, Yu XL, 2003. The prevention of the pest in museums. *Sichuan Cultural Relics*, (1): 91-93. [王春, 于小玲, 2003. 博物馆藏品害虫的综合防治. 四川文物, (1): 91-93]
- Wang WF, Lin CY, 2001. Bionomics and control of *Apopestes spectuam* moth damaging the murals at Mogao Grottoes. *Entomological Knowledge*, 38(4): 282-285. [汪万福, 蔺创业, 2001. 损坏敦煌莫高窟壁画的害虫——仿爱夜蛾的生活习性与防治研究. 昆虫知识, 38(4): 282-285]
- Wang WF, Ma ZF, Lin CY, Xu SQ, Liu FD, 2002. Insect damage to murals in grottoes and the ways of prevention and treatment. *Dunhuang Research*, 74(4): 84-91. [汪万福, 马湛峰, 蔺创业, 徐淑青, 刘复玳, 2002. 昆虫对石窟壁画的危害与防治研究. 敦煌研究, 74(4): 84-91]
- Wang WF, Zhang WM, Li YH, 2000. A study on the blown sand disasters and its control at Mogao Grottoes in *Dunhuang*. *Dunhuang Research*, 63(1): 42-48. [汪万福, 张伟民, 李云鹤, 2000. 敦煌莫高窟风沙危害与防治研究. 敦煌研究, 63(1): 42-48]
- Wang WG, Sun FL, 2003. The novel morphology and structure of *Bacillus thuringiensis* bacteriophage GP-1 and its protein properties. *Acta Entomologica Sinica*, 46(1): 6-10. [王卫国, 孙富林, 2003. 一株苏云金杆菌噬菌体的形态结构及其蛋白质性质. 昆虫学报, 46(1): 6-10]
- Wang ZK, 1986. Introduction on Pest Control Research. Beijing: Agriculture Press. 186-187. [王宗楷, 1986. 害虫防治研究入门. 北京: 农业出版社. 186-187]
- Xu YM, 1982. The evaluation of Dunhuang mural protection methods. *Cultural Object*, (12): 70-74. [徐毓明, 1982. 关于敦煌壁画保护方法的评价. 文物, (12): 70-74]
- Yang ZD, Zhu L, Zhao BG, 2003. Chemical ecology of insect and plant protection. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 27(5): 93-97. [杨振德, 朱麟, 赵博光, 2003. 昆虫化学生态学与植物保护. 南京林业大学学报(自然科学版), 27(5): 93-97]
- Yuan K, Zhu HB, 2002. Synopsis on prevention and cure of the harm of termite in abroad. *Plant Quarantine*, 16(1): 57-58. [袁克, 朱宏斌, 2002. 国外白蚁危害及防治简介. 植物检疫, 16(1): 57-58]

(责任编辑: 袁德成)



图版 I Explanation of Plate I

- A. 莫高窟第 53 窟壁画污染特征 Characteristics of polluted mural in the cave No.53 of Mogao Grottoes;
- B. 榆林窟第 38 窟西北披成虫分布情况 Distribution of moths in the cave No.38 of Yulin Grottoes;
- C. 蛾粪对莫高窟第 85 窟南披壁画影响的偏光照片 Profile of moth feco-polluted mural on south wall in the cave No.85 of Mogao Grottoes;
- D. 蛾粪对第 85 窟东披壁画影响的偏光照片 Profile of moth feco-polluted mural on east wall in the cave No.85 of Mogao Grottoes;
- E. 成虫在莫高窟第 85 窟南披壁画表面分泌残余物 Excretion residues on east wall mural in the cave No.85 of Mogao Grottoes;
- F. 第 85 窟红外分析虫害取样点 The sampling site for analysis of infrared *Apectrum* in the cave No.85 of Mogao Grottoes.